



TITLE:

# 正孔-アクセプタの励起を用いた極低温半導体放射線検出器における正孔供給法の研究

AUTHOR(S):

神野, 郁夫

---

CITATION:

神野, 郁夫. 正孔-アクセプタの励起を用いた極低温半導体放射線検出器における正孔供給法の研究. 2003

ISSUE DATE:

2003-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/84930>

RIGHT:

p.5-32は学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

正孔－アクセプタの励起を用いた  
極低温半導体放射線検出器における  
正孔供給法の研究

(研究課題番号 13480146)

平成 13 年度～平成 14 年度科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2)一般)

研 究 成 果 報 告 書



平成 15 年 3 月

研究代表者 神 野 郁 夫

(京都大学大学院工学研究科 助教授)

科研

2002

230

正孔－アクセプタの励起を用いた  
極低温半導体放射線検出器における  
正孔供給法の研究

(研究課題番号 13480146)

平成 13 年度～平成 14 年度科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2)一般)

研 究 成 果 報 告 書

平成 15 年 3 月

研究代表者 神 野 郁 夫

(京都大学大学院工学研究科 助教授)

## 目 次

緒言	1
研究組織	2
研究経費	2
研究発表	3
研究成果	3
口頭発表および出願した特許(1)	5
口頭発表および出願した特許(2)	9
口頭発表および出願した特許(3)	12

本研究で検出器の材料として用いる p 型シリコンには、ホウ素(B)が添加されている。1K 程度の低温度においては、B が受容体である正孔(h<sup>+</sup>)を捕獲して、B 状態になりえる。この B は、2meV のエネルギー付与により、再び h<sup>+</sup>を解放することが知られている。正孔を捕獲したホウ素(B)から正孔を解放するためのエネルギーは超伝導体検出器において電荷を生成するエネルギー値と同等であるので、この反応を用いることにより半導体検出器でも超伝導体検出器と同様のエネルギー分解能が期待できる。さらに、半導体を検出器の材料として用いるため腐食性が大きな検出器を製造可能である。このため、超伝導体検出器においてエネルギー分解能の劣化の原因となったエネルギーの漏洩がごく少なくなる。理論値により近いエネルギー分解能が得られると期待できる。

上記の p 型シリコンを利用した検出器を動作させるためには、シリコン中の正孔を供給する必要がある。この方式の検出器を最初に研究した Lange と Tsalantzis は、正孔を供給するためにシリコンに光を照射した。このため、シリコン表面に腐食層が存在することとなり、エネルギー分解能は 0.04eV のアルファ粒子に対し、約 100eV となった。

われわれは、Lange と Tsalantzis の研究結果を踏まえ、電荷を注入せずに正孔を供給する方法を検討することとした。まず、p 型シリコンに電荷の蓄積層である超伝導体の構造を作り、バイアス電圧を掛けて電圧を生成し、電圧を正孔を生成し、正孔を蓄積

## 緒言

X線天文学、ニュートリノ分光学などの基礎物理分野、また非破壊分析、X線蛍光分析などの物性科学分野などからより高いエネルギー分解能を持つ光子検出器が要求されている。現在、広く用いられているSi(Li)検出器のエネルギー分解能は、6keVのX線に対して約130eVであるが、期待されているエネルギー分解能は、10eV以下である。

このような高エネルギー分解能を目指して、世界的に超伝導体を利用した検出器の開発が行なわれている。超伝導体検出器においては、信号となる電荷を生成するためのいわゆる  $w$  値が約2meVであり、半導体の場合の約千分の一であることを利用するためである。すなわち、半導体検出器と超伝導体検出器とに同じエネルギーが付与された場合には、超伝導体検出器においては半導体検出器よりも1000倍の数の電荷が生成される。エネルギー分解能が生成電荷量の平方根に比例すると簡便に評価した場合、超伝導体検出器のエネルギー分解能は、半導体検出器のその30倍よい性能を有することになる。

上記の評価法で超伝導体検出器のエネルギー分解能を計算すると、6keVの入射エネルギーに対して、3eV程度が期待できる。しかし、現状の超伝導体検出器では、この理論値の1/5から1/10程度のエネルギー分解能にとどまっている。この現象の大きな原因として、超伝導体検出器の有感体積が小さいために、付与されたエネルギーが検出器から漏洩することが挙げられる。

本研究で検出器の母材として用いるp型シリコンには、ホウ素(B)が添加されている。1K程度の極低温においては、Bがキャリアである正孔( $h^+$ )を捕獲して、 $B^+$ 状態になりえる。この $B^+$ は、2meVのエネルギー付与により、再び $h^+$ を解放することが知られている。正孔を捕獲したホウ素( $B^+$ )から正孔を解放するためのエネルギーは超伝導体検出器において電荷を生成するエネルギー値と同等であるので、この反応を用いることにより半導体検出器でも超伝導体検出器と同様のエネルギー分解能が期待できる。さらに、半導体を検出器の母材として用いるため有感体積が大きな検出器を製作可能である。このため、超伝導体検出器においてエネルギー分解能の劣化の原因となったエネルギーの漏洩がごく少なくなり、理論値により近いエネルギー分解能が得られると期待できる。

上記のp型シリコンを利用した検出器を動作させるためには、シリコン中のBに正孔を供給する必要がある。この方式の検出器を最初に研究したLangeとUmlaufは、正孔を供給するためにシリコンに光を照射した。このため、つねに雑音電流が存在することとなり、エネルギー分解能は5MeVのアルファ粒子に対し、約100keVであった。

われわれは、LangeとUmlaufの研究結果を踏まえ、雑音を導入せずに正孔を供給する方法を検討することとした。まず、p型シリコンに通常の表面障壁型半導体検出器の構造を作り、バイアス電圧を掛けて空乏層を生成し、空乏層以外の領域(非空乏層



領域)を有感体積とすることとし、非空乏層領域における正孔濃度をバイアス電圧の関数として測定した。次に、正孔濃度が異なる2種類のシリコンを貼り合わせ、高正孔濃度シリコンに空乏層を生成することにより、低正孔濃度シリコンに正孔を多数移動させる方法を検討し、正孔濃度の測定を行なってきた。

しかし、2枚のシリコン同士の貼り合わせが完全にはできないことから、1枚のシリコンに金属(M)-絶縁体(I)-半導体(S)構造を作り、IとSとの界面付近に正孔を局在させ、B+状態を作ることを試みた。

今後は、本方式による検出器の実用化を目指して、まず放射線入射によるパルス生成の確認、放射線エネルギースペクトル測定、そしてより高いエネルギー分解能を目指した検出器の最適化を行なって行きたい。

最後に、ともに研究を行なってきた大学院生の松永大輔樹君に謝意を表します。また、ご議論頂いた株式会社レイテック尾鍋秀明氏に感謝いたします。

## 研究組織

研究代表者	神野郁夫	(京都大学大学院工学研究科 助教授)
研究分担者	伊藤秋男	(京都大学大学院工学研究科 教授)
(研究協力者)	松永大輔	

## 研究経費

平成13年度	7,900千円
平成14年度	7,200千円
計	15,100千円

## 研究発表

### 1. 論文

松永大輔 「MIS 構造を用いた電荷開放型放射線検出器に関する研究」  
京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士論文.

### 2. 口頭発表

(1) 松永大輔, 神野郁夫, 中山敦司 「MIS 型放射線検出器の開発」  
第 3 回量子理工学研究実験センター公開シンポジウム, 2002 年 9 月.

(2) 松永大輔, 中山敦司, 神野郁夫 「MIS 構造を用いた電荷解放型放射線検出器に関する研究」  
第 17 回研究会「放射線検出器とその応用」, 高エネルギー加速器研究機構, 2003 年 1 月.

### 3. 特許

松永大輔, 神野郁夫 「半導体放射線検出器」, 出願番号 2002-342039.

## 研究成果

ア. 正孔-アクセプタ励起型放射線検出器においては, 正孔の供給法が最も重要である. われわれはその方法として, MIS 構造を用いた正孔の供給法を考案した. まず, 熱酸化によって p 型 Si の表面に酸化膜を形成し, MIS 構造を製作した. 電気容量-電圧測定の結果から, 室温付近においては良好な MIS 構造ができていることが分かった. しかし低温においては, 価電子帯にある正孔の密度が急激に減少し, その温度領域以下では MIS 構造の電界効果を確認することはできなかった. これは低温における伝導が, 価電子帯にある正孔によるものではなく, 不純物間のホッピング過程によるものであることに起因する.

オーミック接触の確認のための電流-電圧測定の結果からも同様の結論を得ることができる. 低温において, ホウ素濃度が高い領域では自由な正孔が存在するが, ホウ素濃度が低い領域では自由な正孔はほとんど存在しない. 電界をかけても価電子帯に正孔が流れるのではなく, ホウ素濃度が低い領域では正孔が不純物間をホッピングすることにより電流が流れていると考えられる. 不純物間を正孔がホッピングするためには, p 型 Si に少量含まれるドナーからホウ素が電子を受け取ってイオン化した状態であればならない. 今回, 低温において抵抗の変化を測定できなかったのは, 製作した素子にほとんどドナーが含まれていないために, 抵抗値が非常に高くなったからであると結論できる.

また、ホウ素(B)の不純物準位から  $B^+$  のエネルギー準位に移るにはエネルギーが必要である。数 K 以下の低温では、熱エネルギーでの B の不純物準位から  $B^+$  のエネルギー準位へ移ることはほとんどない。よって、 $B^+$  は価電子帯にある正孔が B に捕獲されたものである。

$B^+$  の生成の確認のために、ゲート電圧を OFF にした後の MIS ダイオードの両端の電位差の過渡現象を測定したが、温度による変化は見られなかった。これは上に述べた考察から、低温では価電子帯に正孔がほとんど存在しないためであると考えられる。

以上から、検出器を動作させるために  $B^+$  を生成するには、数 K 以下の低温において価電子帯に正孔が存在する必要がある。その方法の一つとして、p 型 Si にバンドギャップより少し大きなエネルギーを持った光を照射する方法がある。光を照射することによって価電子帯に正孔を発生させ、MIS 構造の電界効果によりできた正孔をまんべんなく p 型 Si 内の B に供給することで、優れた検出器を製作することができる。

#### イ. 口頭発表および出願した特許

次ページ以降に添付する。

(1) 松永大輔, 神野郁夫, 中山敦司 「MIS 型放射線検出器の開発」  
第 3 回量子理工学研究実験センター公開シンポジウム, 2002 年 9 月。

(2) 松永大輔, 中山敦司, 神野郁夫 「MIS 構造を用いた電荷解放型放射線検出器に関する研究」  
第 17 回研究会「放射線検出器とその応用」, 高エネルギー加速器研究機構, 2003 年 1 月。

(3) 松永大輔, 神野郁夫 「半導体放射線検出器」, 出願番号 2002-342039。